

平成 30 年 6 月 22 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2017

課題番号：16K18184

研究課題名(和文) 超高層建物に対するスマート構造ヘルスマニタリングシステム手法の展開に関する研究

研究課題名(英文) Development of smart structural health monitoring system for super high-rise buildings

研究代表者

藤田 皓平(Fujita, Kohei)

京都大学・工学研究科・助教

研究者番号：40648713

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：超高層建物を対象とした構造ヘルスマニタリングシステムの開発を目的として、全体曲げ変形を考慮可能な曲げせん断型モデルを用いて層剛性を直接的に評価する剛性同定法を構築した。提案手法では、付加的な観測情報として床回転角が観測可能であるとした場合に、回転1次固有モードの補正を行う手法を提示した。付加観測により条件付き確率として回転1次固有モードの確率分布を更新し、累積頻度関数における頻度に関する層方向の補間を行うことで、回転剛性の同定精度を改善する。本提案手法では、曲げせん断型モデルの逆固有モード展開に基づき回転剛性を評価するため、回転剛性を安定して同定することが可能となる。

研究成果の概要(英文)：For the purpose of developing a smart structural health monitoring system for super high-rise building, the story stiffness identification method using a shear-bending model was proposed to directly evaluate the story stiffnesses. The shear and bending model is useful to take into account the influence of bending deformation of high-rise buildings. In the statistical approach method, by supposing the floor rotation angle can be obtained as the additional measurement data, we proposed a new algorithm to correct the lowest mode shape of rotation angle. In this method, the probabilistic distribution of the lowest mode shape of floor rotation angle can be updated based on the conditional probability problem. By using the inverse-mode method for the shear-bending model, the bending stiffness can be identified stably from the updated the lowest-mode shape of floor rotation angle.

研究分野：建築構造・応用力学

キーワード：構造ヘルスマニタリング システム同定 常時微動観測 層剛性同定 超高層建物

1. 研究開始当初の背景

近年の地震被害を受けて、震源地から離れた都市部における超高層建物に対する長周期地震動の影響が危惧されている。東南海地震などで今後発生が懸念される海溝型地震に対して超高層建物の健全性を早期に確認し、社会機能の復元性を高めることは極めて重要である。構造ヘルスマニタリングは、建物の応答性状を種々のセンサーによって取得し、建物の健全性を評価する手法であり、その需要が高まっている。ここで、建物の健全性の評価として建物の固有周期や減衰定数といったモーダル情報に加えて、建物の層剛性などの物性が挙げられ、これらを同定するシステム同定法は構造ヘルスマニタリングにおける基幹技術である。

建物の層剛性を同定するシステム同定では、せん断型モデルなどを介して建物の構造性能を同定する。特に、超高層建物では、アスペクト比が大きいことから全体曲げ変形を考慮可能な曲げせん断型モデルが適している。しかしながら、水平床応答のみを扱う場合には、曲げ剛性を安定して同定することは困難である。これは、曲げせん断型モデルの回転剛性は、低次の固有振動数に対して鈍感であることに起因するためである。

2. 研究の目的

超高層建物への適用を前提とした実用的な構造ヘルスマニタリング手法の開発と運用を目指して、曲げせん断型モデルを用いた建物剛性を直接評価するシステム同定法の信頼性を向上させる。曲げせん断型モデルを対象とする場合には、従来のせん断型モデルとして同定する手法と比較して、回転剛性も同定を行う必要がある。同定に用いることができる観測情報が限られていることから、回転剛性を安定して高精度に同定することを目的として、せん断型モデルとしての同定結果を利用する方法を展開する。さらに、床回転角の付加観測が可能であるというシナリオを想定し、確率論的アプローチに基づくモデル更新手法を構築する。

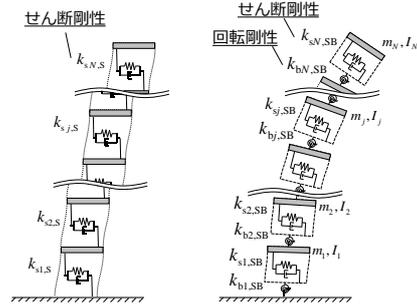
3. 研究の方法

本研究課題では、図 1(b)に示すような曲げせん断型モデルを対象とした剛性同定の信頼性を向上するために、いくつかの理論的展開を提示した。

まず、せん断型モデルと曲げせん断型モデルを併用する手法では、水平 1 次モードについてはせん断型モデルと曲げせん断型モデルの両者でほぼ違いがないことを明らかにする。この結果を受けて、水平 1 次モードをせん断型モデルにより求め、これを曲げせん断型モデルにおける 1 次モードとして利用する。せん断型モデルを併用することで得られた 1 次モードを用いることで、曲げせん断型モデルにおけるせん断力分布が得られ、層間変位におけるせん断変形成分を抽出するこ

とが可能となり、回転剛性を評価することが可能である。図 2 に両モデルを併用する剛性同定手法の概要を示す。

次に、曲げせん断型モデルの逆固有モード展開を行うことで、水平及び回転 1 次モードとせん断剛性及び回転剛性の関係 (図 3) を見出すことで、水平及び回転 1 次固有モードを同定することで、剛性同定を行う手法を展開する。回転 1 次固有モードの同定には、各層床回転角の応答データが必要となる。しかしながら、現実の建物では、床回転角の観測は困難である。そこで、限定された観測情報として頂部床回転角などの観測情報を基に、回転 1 次固有モードをベイズ推定等の手法を用いて確率的に評価する枠組を構築する。



(a) せん断型モデル, (b) 曲げせん断型モデル

図 1 同定モデル

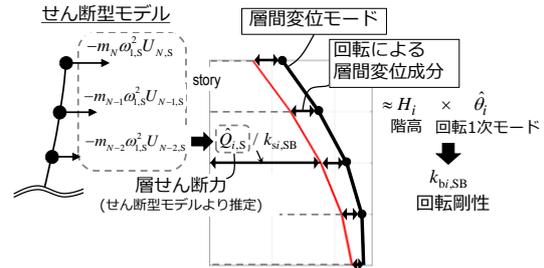


図 2 せん断型モデルと曲げせん断型モデルを併用する剛性同定法の概要

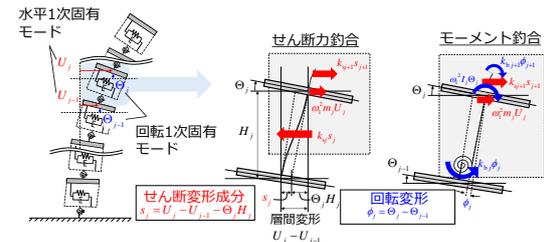


図 3 曲げせん断型モデルにおける逆固有モード展開の概要

4. 研究成果

せん断型モデルと曲げせん断型モデルを併用する剛性同定法については、本研究代表者が以前に提案している曲げせん断型モデルを対象としたシステム同定法によって得られた回転剛性を補正する方法として展開した。本手法では、既往の手法としてせん断型モデル及び曲げせん断型モデルとしてそれぞれの同定関数を用いて剛性を同定した上で、せん断型モデルと曲げせん断型モデルの 1 次水平固有モードは類似していること、

曲げせん断型モデルのせん断剛性は高精度で同定が可能であることから、曲げせん断型モデルにおける回転剛性を1次固有層間変位モードにおけるせん断変形成分を取り除くことで、直接的に回転剛性を評価することが可能であることを明らかにした。しかしながら、この手法では、回転剛性の補正効果は限定的で、恣意的に設定すべきパラメータが多いことが課題となっている。なお、本成果は、雑誌論文①で取りまとめた。

そこで、曲げせん断型モデルのせん断剛性と回転剛性を逆固有モード展開手法により同定する新たな方法を構築した。この方法では、曲げせん断型モデルとして、水平及び回転1次固有モードを同定することで、せん断剛性と回転剛性を一意に評価することが可能となる。逆固有モード展開手法では、従来の方法で安定性の問題があった振動数領域での同定関数の評価が不要となることが特徴である。水平及び回転1次固有モードの同定は、いわゆるモーダル同定に分類され、対象建物の種々の応答からモード形を高精度に同定することが課題となる。本研究では、モーダル同定として、部分空間法を活用し、各層の伝達関数のピーク値から1次固有モードを同定する手法を提案した。手法によるモード形の同定の概要を図4に示す。

本提案手法の実建物への適用性を考慮すれば、各層の観測データを同時に収集することはコスト的な問題で実現性に乏しい。そこで、各層の応答データを非同時に収集した場合について、本提案手法の適用性を検討した。図4に示すように、各層の伝達関数を非同時に評価した場合であっても、1次固有モード

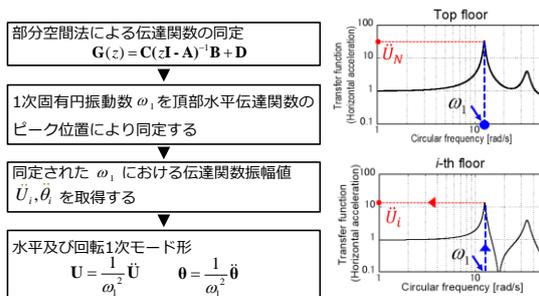


図4 部分空間法による伝達関数に基づくモード形の同定の概要

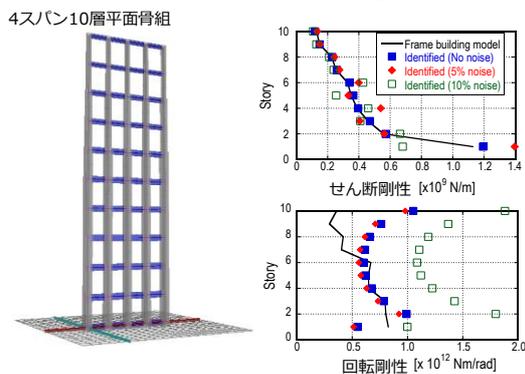


図5 10層空間法による伝達関数に基づくモード形の同定の概要

を安定して得られることを明らかにした。本手法の適用例として、図5では、4スパン10層平面骨組を対象として、本提案手法により曲げせん断型モデルとして同定を行った。結果図を図5右に示す。なお、回転1次固有モードについては、頂部のみの応答データを利用できるものとし、種々の構造パラメータに対する回転1次固有モードの近似曲線を導くことで経験則に基づき評価を行った。また、同図において、正解とする剛性については、対象骨組に静的荷重を作用させた際の各層の水平変位と床回転角を基に得られる剛性として求めた。同図より、数値シミュレーションで得られた疑似観測データにおいてノイズの影響を考慮した場合でも、概ね良好な精度で剛性同定が行うことが可能であることを明らかにした。但し、回転剛性については分布形状が対応しない。これは、本手法で用いた経験則による回転1次固有モードから得られる層間回転モードに誤差が生じるためである。本成果については、雑誌論文②で取りまとめた。

前述のように曲げせん断型モデルに対する逆固有モード展開を適用することで、剛性同定を行うためには水平及び回転1次固有モード形の同定が重要な課題である。特に回転1次固有モードについては、一般には床回転応答が必要となるが、実際の高層建物での実測はノイズの影響などが懸念され、データ収集は困難である。前述の方法では、頂部の床回転角のみを既知とし、それ以外の層については、経験則を提案し、モード形の推定を行

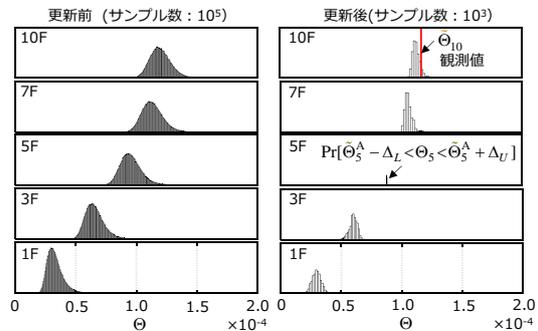


図6 条件付確率による回転1次固有モード確率分布の更新

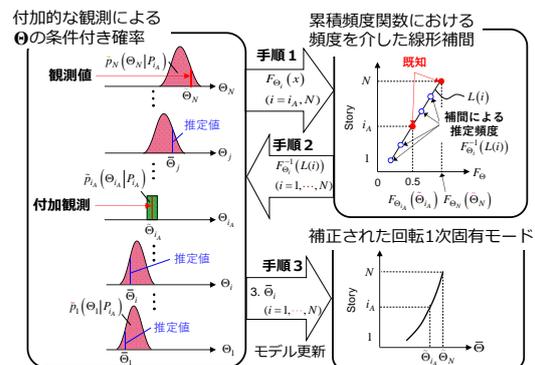


図7 確率モデルの更新に基づく回転1次固有モードの補正

った。一方、確率論的アプローチを採用した剛性同定法では、床回転応答の観測情報として頂部以外の層位置について付加的に行った場合に、回転1次固有モードを更新することで、回転剛性の補正を行う手法を提案した。本手法では、既往の手法により曲げせん断型モデルのせん断剛性及び回転剛性が得られているとし、これを事前モデルとして定義する。同定された剛性値を確率変数とみなして、一定のばらつきを与えることで確率曲げせん断型モデルを生成する。モンテカルロシミュレーションにより回転1次固有モードの確率分布を評価した。付加的な観測として例えば、中間層での床回転角が得られたとした場合には、当該層における固有モード成分値を取得することが可能であり、図6に示すように確率曲げせん断型モデルの確率分布を更新することが可能となる。

付加的な観測によって更新された回転1次固有モードの確率分布では、未観測の層レベルについては一定のばらつきを有している。従って、ある特定の剛性値を確定するためには、更新された確率分布上で、回転1次固有モードの振幅値を確定させる必要がある。本研究では、更新された回転1次固有モードの確率分布の累積頻度関数を求める。観測値を有する層位置での頻度の度数は、定義上0.5となるため、頂部での観測値に対する度数を用いて線形補間を行う方法を提案した。図7に提案手法の概要を示す。

同定対象骨組から得られる正解の回転1次固有モードの成分値と、本手法による推定値について、確率分布の箱ひげ図に合わせて図8に示す。同図より、頻度を介して線形補間して得られた推定値は、第1層と第9層でやや正解値と差があるものの概ね正解値に対応

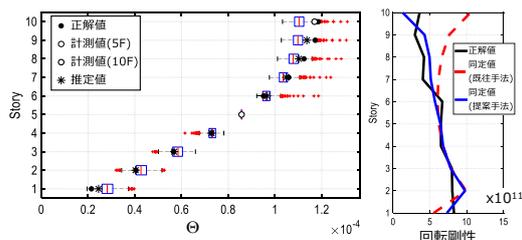


図8 モデル更新後の回転1次固有モードの分布における正解値と推定値の比較

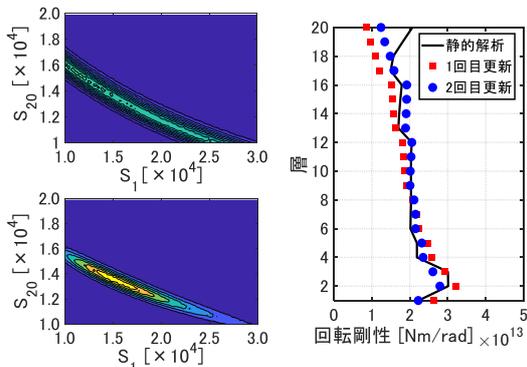


図9 ベイズ推定による図10 回転剛性確率分布の更新

していることが確認できる。また、図8右では、最終的に得られた曲げせん断型モデルの回転剛性について、対象骨組の静的解析から得られる正解値と、既往の手法による同定値と、本提案手法により得られた補正値の比較を示す。同図より、回転1次固有モードを確率的手法によるモデル更新を行うことにより、回転剛性の層方向分布を既往の手法と比べてさらに高精度で同定可能であることを示した。本成果については、雑誌論文③で取りまとめた。

前述の確率論的アプローチによる剛性同定法では、既往の手法で得られたせん断剛性及び回転剛性を基に確率曲げせん断型モデルを作成するため、既往の手法で得られた回転剛性に依存して実現される確率曲げせん断型モデルが限定される可能性がある。そこで、この問題を改良する手法として、既往の手法においても比較的高精度に同定可能なせん断剛性のみを用いて、せん断剛性に対する回転剛性の剛性比率を介して確率曲げせん断型モデルを生成することで回転剛性を補正する手法を示す。剛性比率関数の形状パラメータに対して、頂部の床回転角応答データのみ使用できる場合の事前モデルと、付加的な観測情報として中間層の応答が得られる場合についてベイズ推定法を用いて事後モデルとしてモデル更新を行う方法を提案した。

対象骨組として20層立体骨組の常時微動応答データに対して本手法を適用した結果からベイズ推定による剛性同定法の優位性を明らかにした。図9では、剛性比率関数の形状パラメータである第1層と頂部での剛性比率値を独立にそれぞれパラメトリックに変動させた上に、回転1次固有モードの層方向分布を1次関数として仮定した場合に、回転1次固有モードの確率分布の更新の様子を示したもので、付加観測情報が多いほど、特定の形状パラメータにおける尤度が大きいことが確認できる。また図10では、モデル更新後の回転剛性の層方向分布を示している。付加的な観測情報が多いほど回転剛性の同定精度が向上することを明らかにした。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計3件)

- ① **K. Fujita** and I. Takewaki, Advanced system identification for high-rise building using shear-bending model, *Frontiers in Built Environment*, Vol.2, Article 29, 2016.
<https://doi.org/10.3389/fbuil.2016.00029>
- ② **K. Fujita**, Y. Fujimori and I. Takewaki, Modal-physical hybrid system identification of high-rise building via subspace and inverse-mode methods, *Frontiers in Built Environment*, Vol.3, Article 51, 2017.
<https://doi.org/10.3389/fbuil.2017.00051>
- ③ **K. Fujita** and I. Takewaki, Stiffness identification of high-rise buildings based on statistical

model-updating approach, *Frontiers in Built Environment*, Vol.4, Article 9, 2018.
<https://doi.org/10.3389/fbuil.2018.00009>

[学会発表] (計 5 件)

- ① K. Fujita, R. Koyama, I. Takewaki, Advanced system identification for super high-rise building using shear-bending model, Engineering Mechanics Institute Conference (EMI2016), 2016 May 23, Vanderbilt University (America, Nashville)
- ② 藤田皓平, 小山龍二, 竹脇 出, 高層建物の常時微動観測によるせん断型モデルと曲げせん断型モデルを併用した剛性同定法, 日本建築学会大会学術講演梗概集(福岡), 2016年8月26日, 福岡大学(福岡県, 福岡市)
- ③ I. Takewaki, Y. Fujimori, K. Fujita, Stiffness identification of high-rise buildings via subspace and inverse-mode methods, International Workshop on Structural Health Monitoring (IWSHM2017), 2017 September 12, Stanford university (America, California)
- ④ 藤田皓平, 藤森裕平, 辻聖 晃, 竹脇 出, 部分空間法と逆問題型手法を用いた高層建物のシステム同定, 日本建築学会大会学術講演梗概集(広島), 2017年9月3日, 広島工業大学(広島県, 広島市)
- ⑤ 藤田皓平, 星 祐翔, 竹脇 出, ベイズ推定を用いたモデル更新による高層建物の剛性同定, 日本建築学会近畿支部研究発表会, 2018年6月24日, 大阪工業技術専門学校 (大阪府・大阪市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

藤田 皓平 (Kohei Fujita)
京都大学・工学研究科・助教
研究者番号 : 40648713